

Introdução ao Controle Fuzzy

Alessandro Copetti

e-mail: alessandro.copetti@gmail.com

Contribuições:

Luciano Bertini

Vinícius Weiner

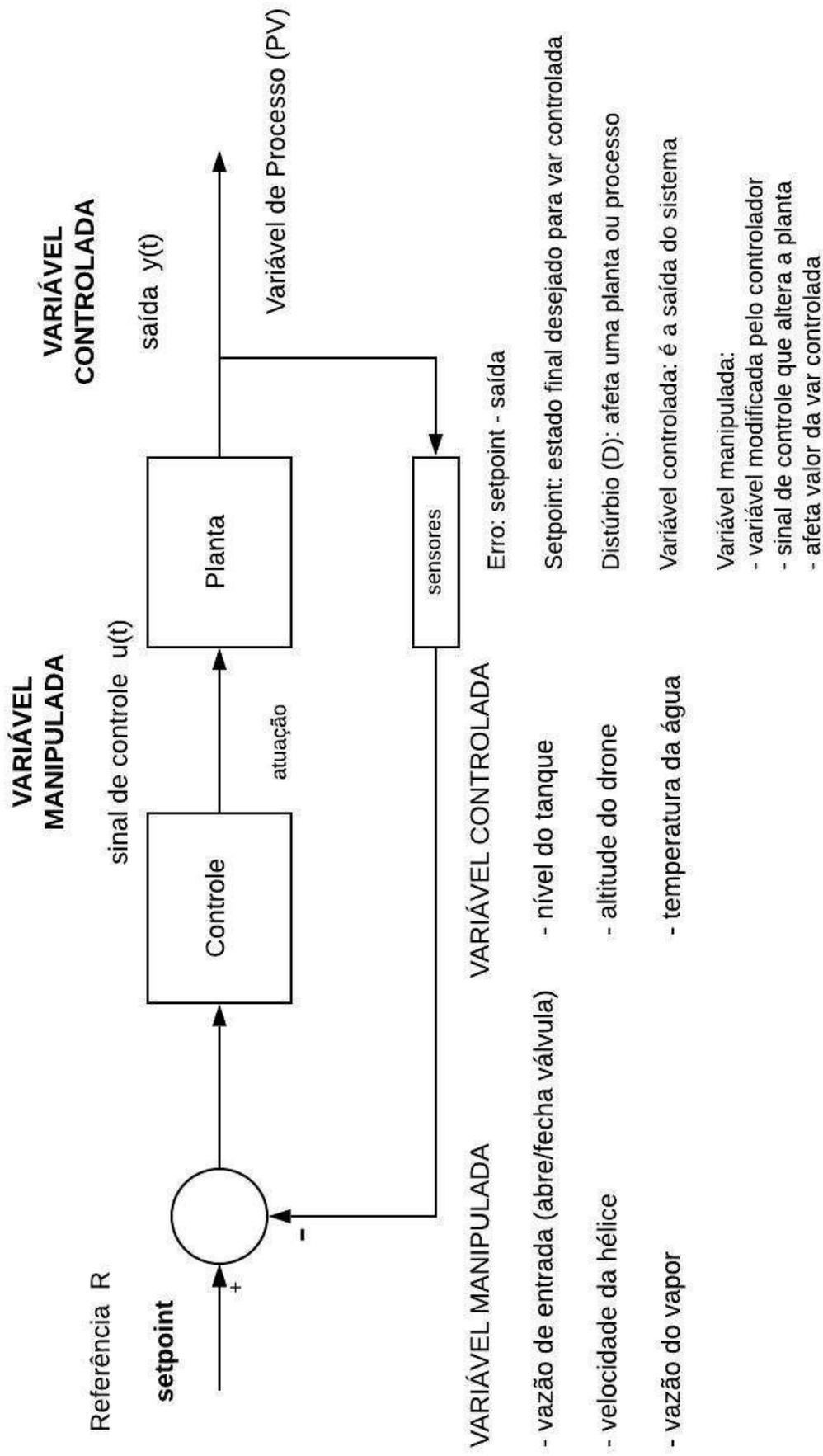
Tópicos

- Respostas do Controle
- Controle Fuzzy
- Índices de desempenho
- Exemplo

Respostas do Controle

Respostas do Controle

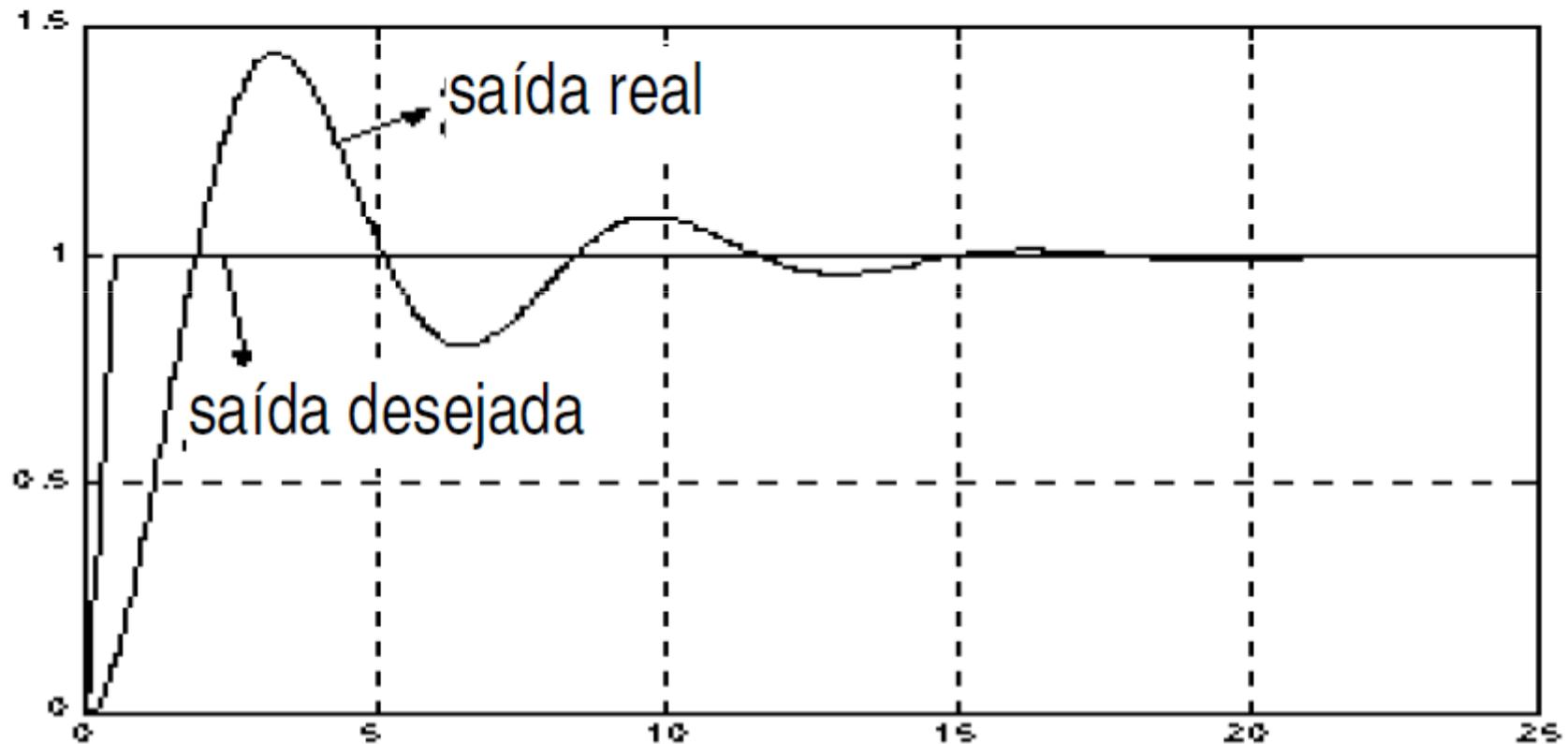
- Na estratégia de controle realimentado:
 - o valor de uma variável controlada (var de processo) é medido com um sensor e comparado ao valor desejado (setpoint)
 - a diferença encontrada entre o setpoint (ponto de ajuste) e a variável controlada determina um erro
 - é utilizada na definição da saída do controlador para ajustar uma variável manipulada (saída do controlador)



Respostas do Controle

- Objetivo: minimizar o erro: diferença entre a referência e a saída real (variável controlada)
 - Parâmetros de Projeto
 - Regime Transitório
 - tempo de subida
 - percentual de overshoot
 - tempo de acomodação
 - Regime Permanente
 - erro (*steady state offset*)
-

Respostas do Controle – resposta típica



Respostas do Controle

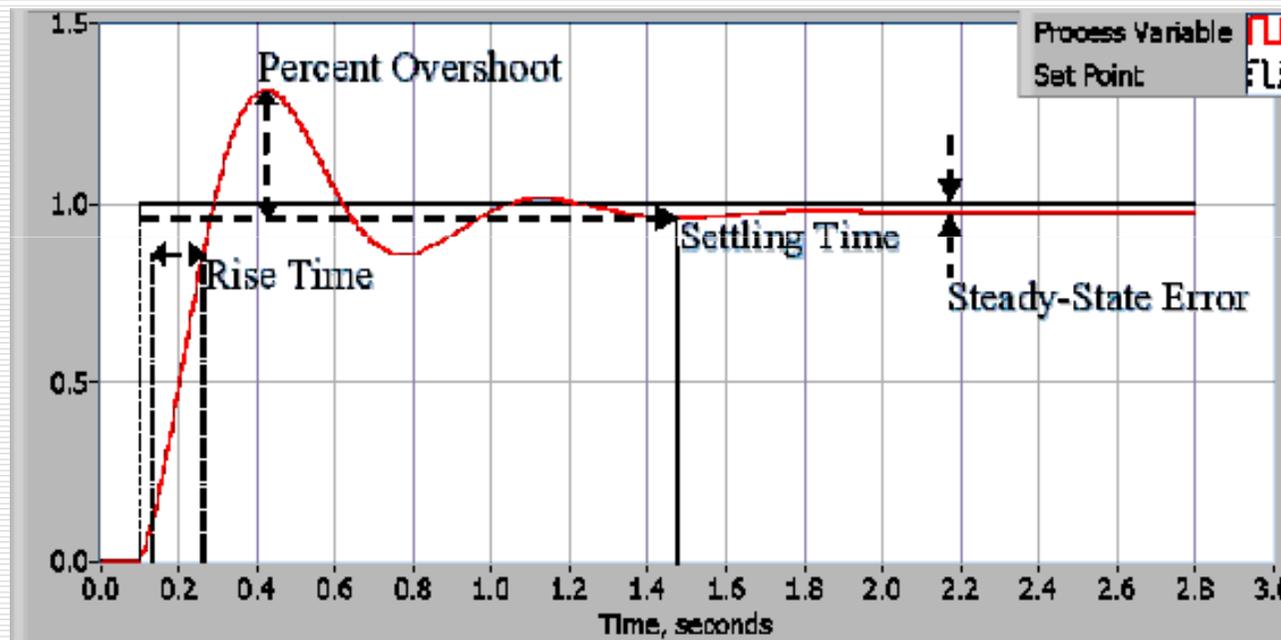
- **tempo de subida** (rise time)
 - é o tempo que o sistema leva para ir de 10% a 90% do setpoint.

- O percentual de **Overshoot** (sobre valor)
 - É o valor que a variável controlada ultrapassa o setpoint por ocasião da primeira oscilação.
 - Normalmente é expresso em termos percentuais em relação ao setpoint.
 - Ou pico da resposta

Respostas do Controle

- **Settling time** (tempo de acomodação)
 - é o tempo necessário para a variável do processo chegar dentro de uma determinada porcentagem (normalmente 5%) do setpoint
 - Ou tempo de assentamento/estabilização
- **Steady-State** de erro
 - é a diferença final entre as variáveis do processo e o setpoint
 - Ou erro em regime permanente (offset)

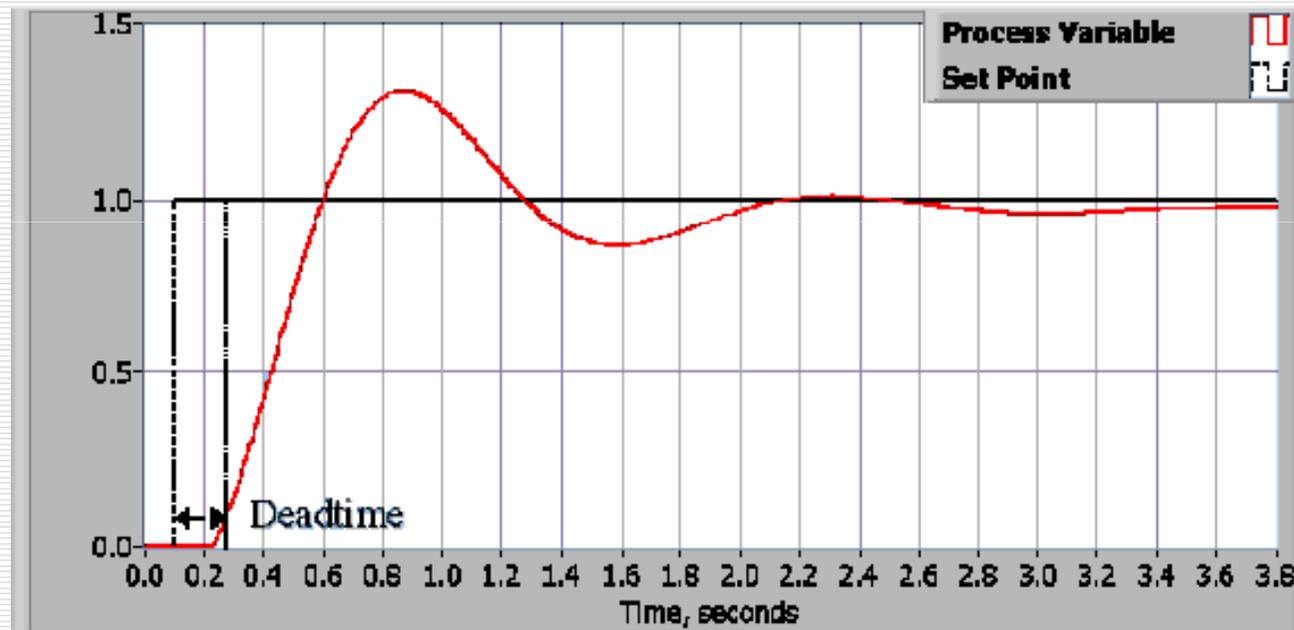
Respostas do Controle



Respostas do Controle – Deadtime (tempo morto)

- Atraso entre o momento que ocorre uma mudança da variável de processo e quando essa mudança pode ser observada. Por exemplo:
 - um sensor de temperatura colocado longe de uma válvula de entrada de água fria não irá medir a mudança da temperatura imediatamente se a válvula for aberta/fechada
 - uma válvula lenta para abrir ou fechar
 - atraso causado pelo fluxo do fluido através de tubulações
-

Respostas do Controle – Deadtime (tempo morto)



Processos complexos

- Características:
 - não-linearidades
 - instabilidade
 - tempo morto elevado
 - comportamento não estacionário
 - presença de perturbações
 - acoplamento entre as variáveis
-

Controle Fuzzy

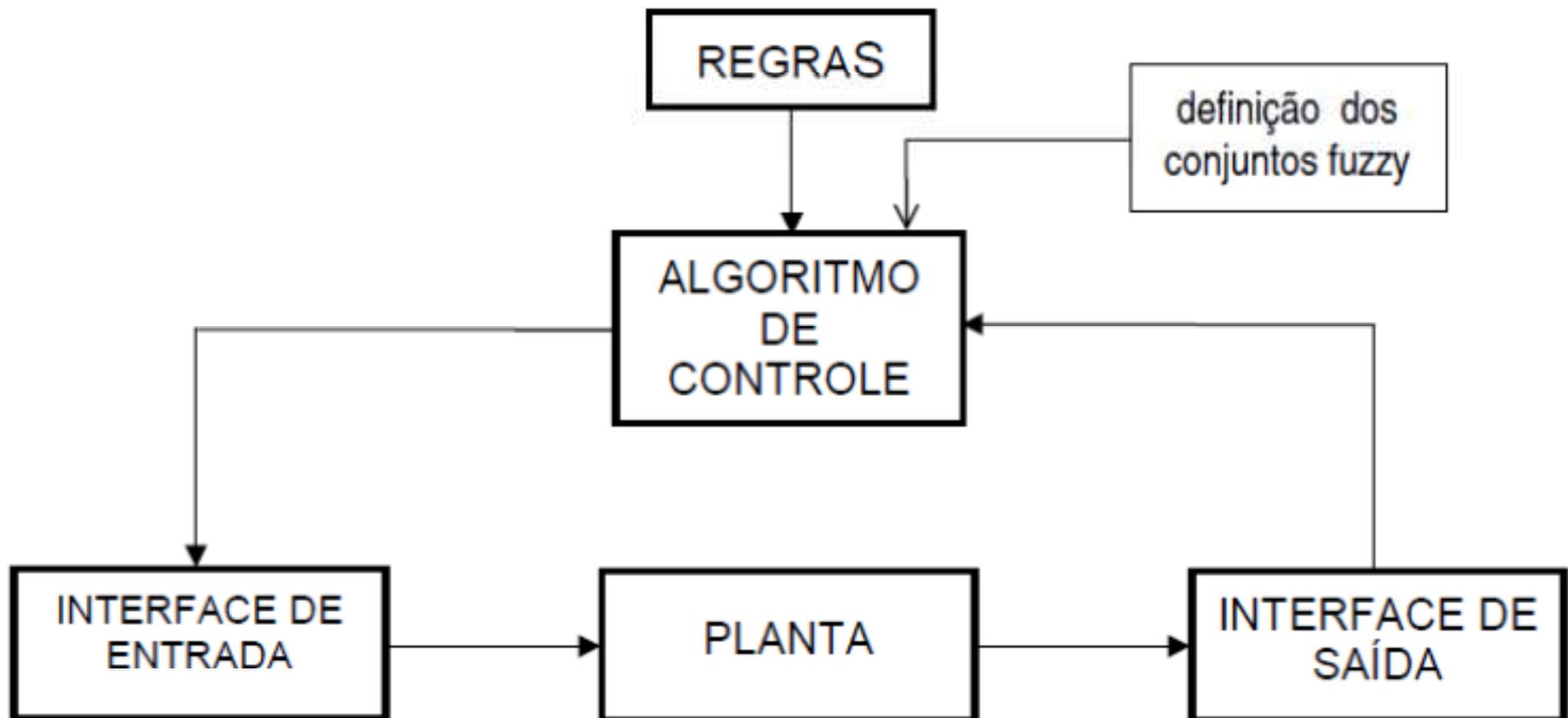
Controle Fuzzy

- O controle Fuzzy é uma função não-linear entre as variáveis de entrada e de saída que reflete os conhecimentos que os operadores e/ou engenheiros possuem da operação deste processo
- Um regulador fuzzy é um sistema de controle baseado em regras que interpolam suavemente o comportamento desejado para o sistema

Controle Fuzzy

- ❑ Aproxima o entendimento humano do problema com a computação do mesmo (aplicação do conhecimento tácito)
 - ❑ No controle fuzzy, pode ser aplicado no treinamento de operadores aprendizes
-

Controle Fuzzy



(Tanscheit, 2007)

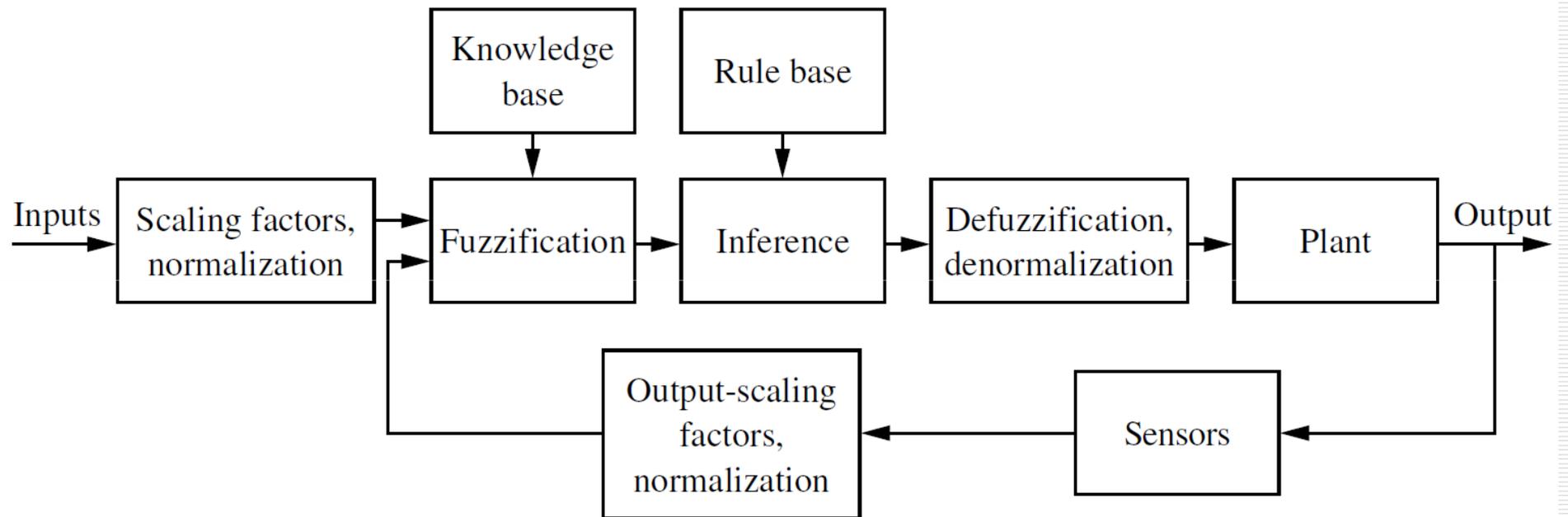
Controle Fuzzy

- Interface de saída => adquire informações (precisas) a respeito da planta e as traduz para a linguagem de conjuntos fuzzy
 - compreende:
 - conversores A/D e D/A
 - fatores de escala
 - procedimentos de quantização

Controle Fuzzy

- Interface de entrada => converte a saída fuzzy do controlador para um valor preciso a ser fornecido à planta
 - Compreende:
 - métodos de defuzzificação
 - fatores de escala
 - integradores
 - conversores

Controle Fuzzy - Componentes



- Diagrama de blocos Controlador Fuzzy

Controlador Fuzzy - Etapas para criação ^{-1/2}

- ❑ Identificar as variáveis (entradas, estados e saídas) da planta
- ❑ Particionar o universo de discurso ou o intervalo gerado por cada uma das variáveis em um número de subconjuntos fuzzy, atribuindo a cada um rótulo linguístico
- ❑ Determinar uma função de pertinência para cada subconjunto
- ❑ Atribuir um relacionamento fuzzy entre os subconjuntos fuzzy das entradas ou dos estados de um lado, e os subconjuntos fuzzy das saídas de outro, assim formando a base de regras

Controlador Fuzzy - Etapas para criação ^{-2/2}

- ❑ Escolher os fatores de escala apropriados para as variáveis de entrada e saída, a fim de normalizar as variáveis para os intervalos: $[0, 1]$ ou $[-1, 1]$
 - ❑ Fuzzificar as entradas para o controlador
 - ❑ Usar o raciocínio aproximado para inferir a saída de cada regra
 - ❑ Agregar as saídas fuzzy recomendadas por cada regra
 - ❑ Aplicar a defuzzificação para gerar uma saída precisa
-

Controlador Fuzzy - Definição das funções de pertinência

- Um número muito grande de valores linguísticos
 - sobrecarrega o sistema
 - possibilita uma resposta e um ajuste mais fino do controle

Base de conhecimento

- Métodos para aquisição do conhecimento:
 - obtenção manual
 - modelagem do comportamento do operador
 - modelagem do processo
 - extração automática do conhecimento

Base de conhecimento – obtenção manual

- Problemas:
 - a seleção e a disponibilidade de um especialista competente na área
 - a capacidade de explicitar o raciocínio do especialista
 - normalmente fornece a solução do problema, mas não as etapas utilizadas para se chegar a essa conclusão
 - as divergências e contradições eventuais entre os conhecimentos fornecidos por diversos operadores ou especialistas da área
-
- a manutenção desses conhecimentos

Base de conhecimento

- Modelagem do comportamento do operador
 - adquire conhecimento observando o operador durante o seu trabalho
 - Modelagem do processo
 - utiliza um modelo do processo para construir o controlador
 - em seguida, constrói um conjunto de regras através de uma heurística a partir do modelo
-

Base de conhecimento

- Extração automática do conhecimento
 - utilizada quando se dispõe de uma grande quantidade de dados relativos ao problema
 - técnicas utilizadas: neuro-fuzzy, algoritmos genéticos e auto-aprendizagem
-

Base de conhecimento - regras

- Regras de controle fuzzy são de fácil compreensão pelo pessoal de manutenção, na medida em que são baseadas no senso comum, e o efeito ou resultado de cada regra pode ser facilmente interpretado
 - inclusão de condições de alarme que disparam raramente

- Todas as funções de controle associadas com uma regra podem ser testadas individualmente. Isso aumenta a facilidade de manutenção, porque a simplicidade das regras permite o uso de pessoal menos treinado

Controlador Fuzzy - Definição das funções de pertinência

□ Exemplo:

- PG: positiva grande (PL ou PB)
 - PM: positiva média (PM)
 - PP: positiva pequena (PS)
 - Z: zero (ZE)
 - NP: negativa pequena (NS)
 - NM: negativa média (NM)
 - NG: negativa grande (NL ou NB)
-

Variáveis de entrada

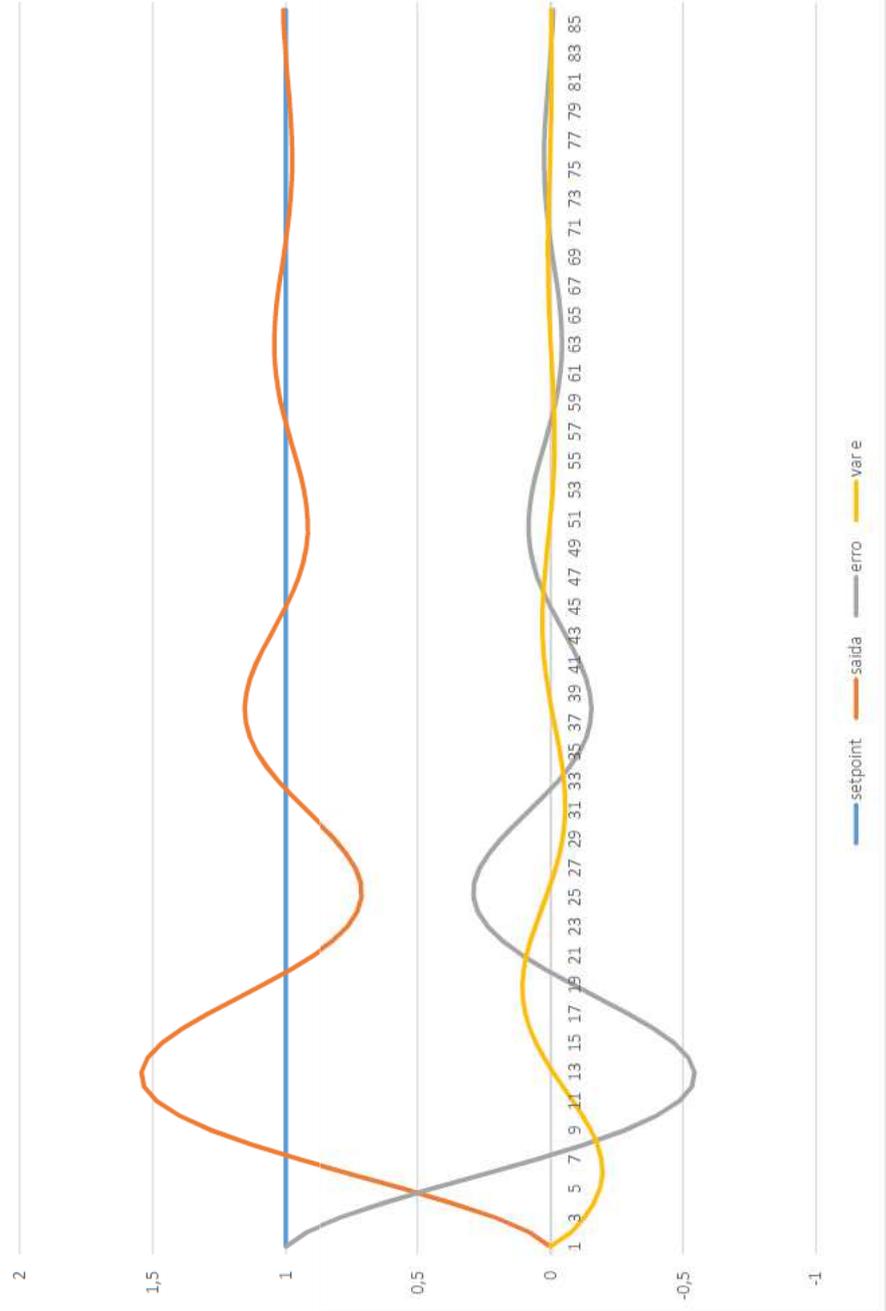
- As variáveis de entrada são usualmente:
 - o **erro**, gerado a partir da diferença entre o sinal de referência e a saída das planta, e a
 - **variação do erro**, normalmente gerada a partir do erro
 - é necessário utilizar **fatores de escala** para fazer corresponder, aos valores reais e medidos do erro e variação do erro, valores normalizados
-

Erro ($=SP-y$) e variação do erro

- Um valor negativo do erro implica que a saída da planta está acima do setpoint
 - Um valor positivo do erro implica que a saída da planta está abaixo do setpoint

 - Um valor negativo da variação do erro implica em um aumento na saída y da planta
 - Um valor positivo implica um decréscimo na saída y
-

Erro e Variação do Erro



Normalização

```
1. function [ Data_out ] = scaleData( Data, fmin, fmax)
2. [m, n] = size(Data); % m data points with n feature
   dimension
3. Data_out = zeros(m,n);
4. for i = 1 : n
5.     X = Data(:,i);
6.     Xmin = min(Data);    Xmax = max(Data);
7.     X_std = (X - Xmin) ./ (Xmax - Xmin);
8.     X_scaled = X_std .* (fmax - fmin) + fmin;
9.     Data_out(:,i) = X_scaled;
10. end
11. end
```

Índices de Desempenho

Controle PID

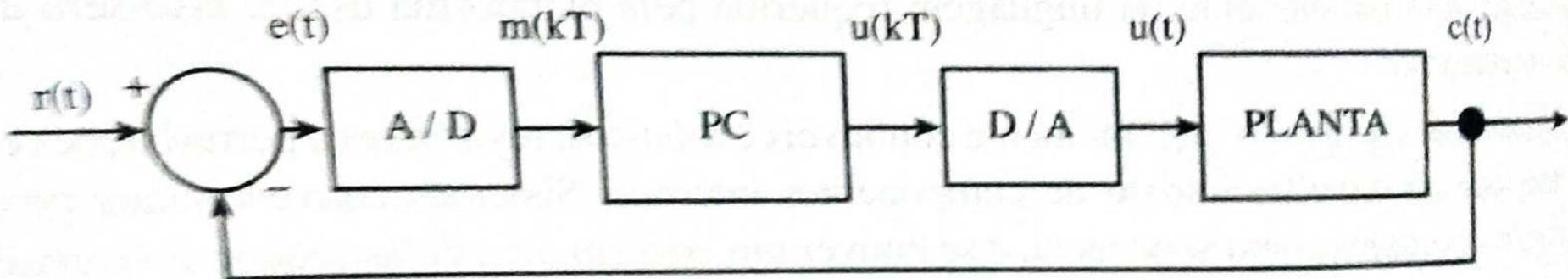
- Componente P (Proportional)
 - representa o erro de realimentação instantâneo **presente**
 - Componente I (Integral)
 - representa a integral do erro que contribui para a história **passada** da realimentação
 - Componente D (Derivative)
 - representa a derivada do erro, a qual tende a antecipar o comportamento **futuro** do erro de realimentação
-

Controle PID

- Componente P (Proportional)
 - Acelera a resposta; produz offset
 - Componente I (Integral)
 - Elimina offset; produz respostas lentas com longas oscilações
 - Componente D (Derivative)
 - Antecipa futuros erros e introduz a resposta apropriada; introduz efeito estabilizante
-

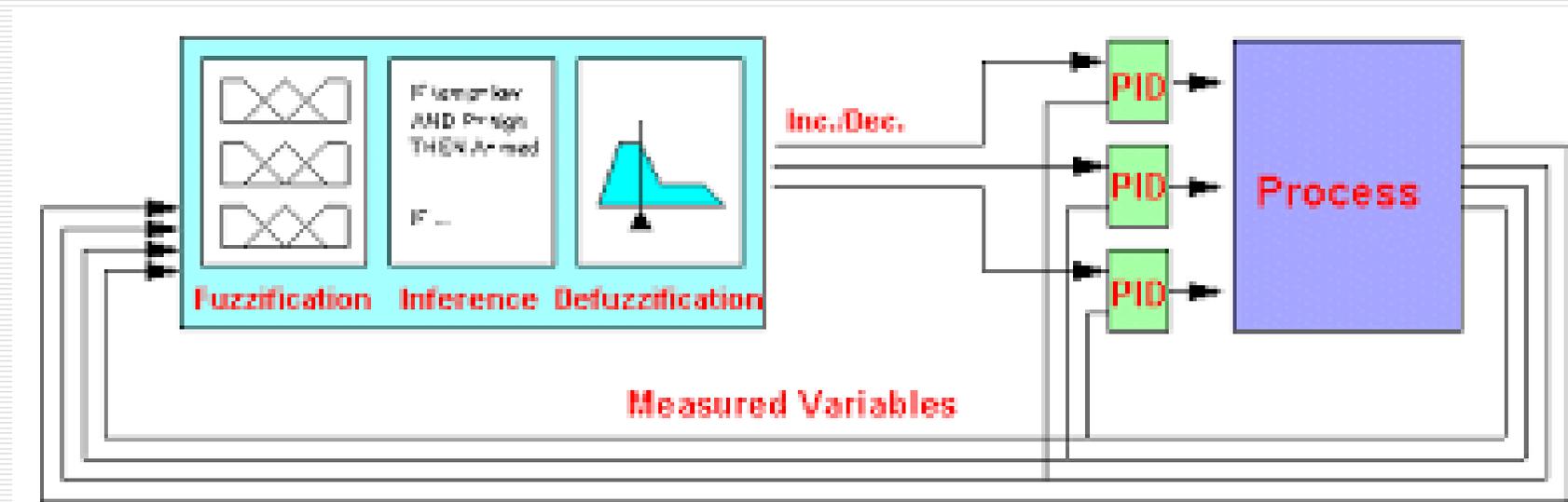
Controle PID

- ❑ Sinal analógico $e(t)$ é convertido para uma sequência discreta de números, $m(kT)$
- ❑ A sequência de controle $u[kT]$ é convertida por um D/A para o sinal analógico $u(t)$

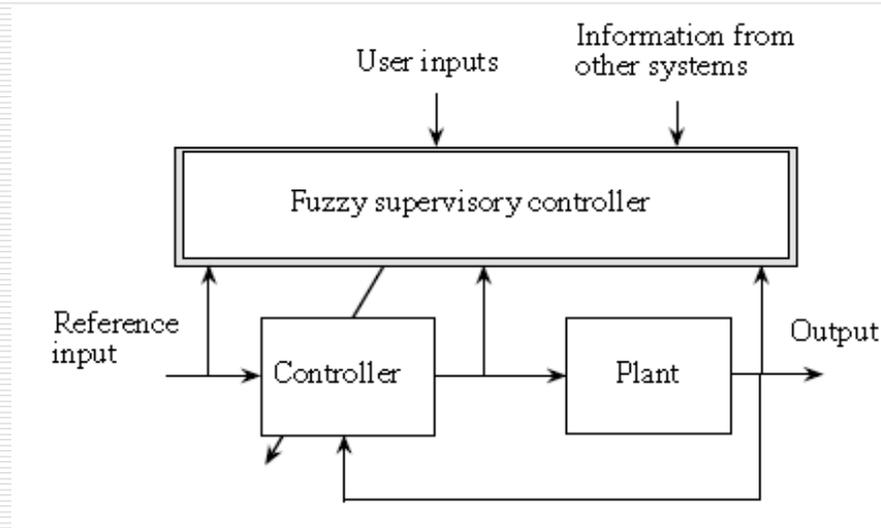


Sistema supervisorio de controle

- Aplicado geralmente para controlar o valor de referência (set-point) de controladores PID



Sistema supervisorio de controle



Sistema supervisorio de controle

- É um tipo de sistema especialista que monitora as variáveis de interesse para o processo e, com o conhecimento obtido com os especialistas para construção do conjunto de regras, compara com os valores de referência
- Atua em um nível superior, assumindo momentaneamente controle da planta até retornar as condições normais de processo

Critérios de Desempenho

- Avalia a resposta do sistema de controle e também ajusta constantes no PID

1. Integral of Square Error (ISE).

$$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt$$

2. Integral of the Absolute value of the Error (IAE).

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

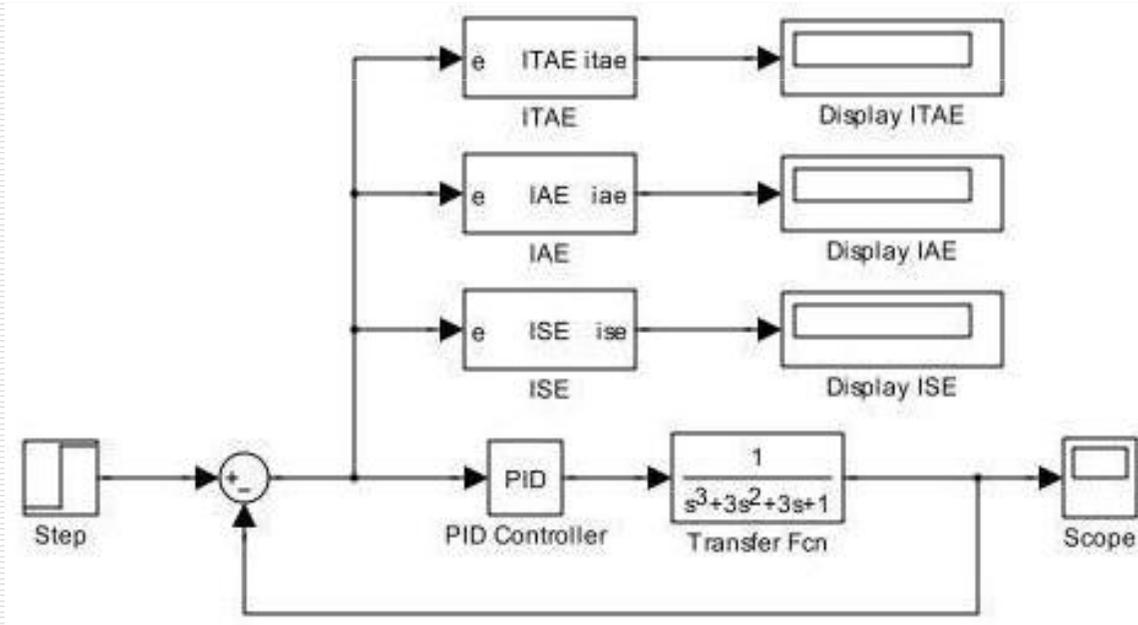
3. Integral of the Time multiplied by the Absolute value of the Error (ITAE).

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt$$

Critérios de Desempenho

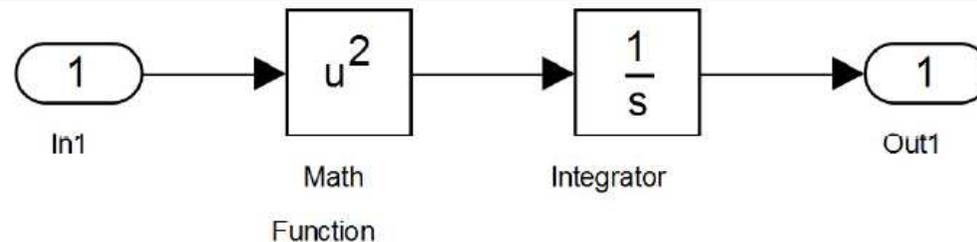
- Yi Cao, 2007.

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/17287-simulink-library--performance-index>



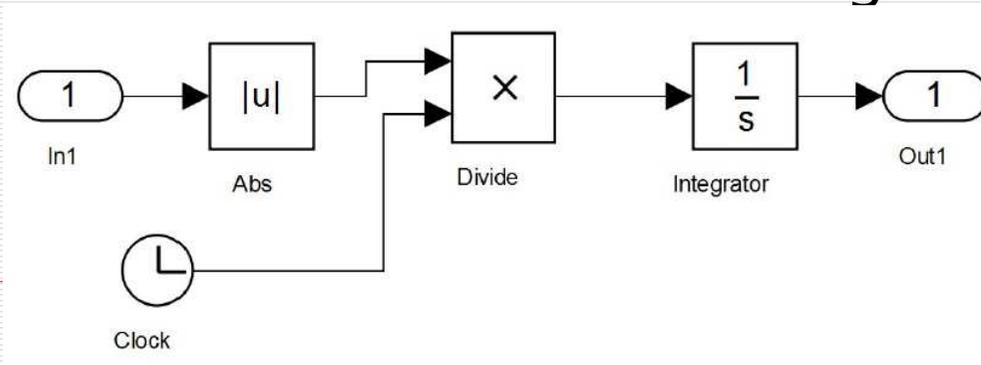
Critérios de desempenho ISE

- ❑ Erros grandes incrementarão o valor do ISE mais do que o IAE
- ❑ ISE favorecerá respostas com menor overshoot em mudanças de carga
 - mas ISE dará um tempo de acomodação mais longo



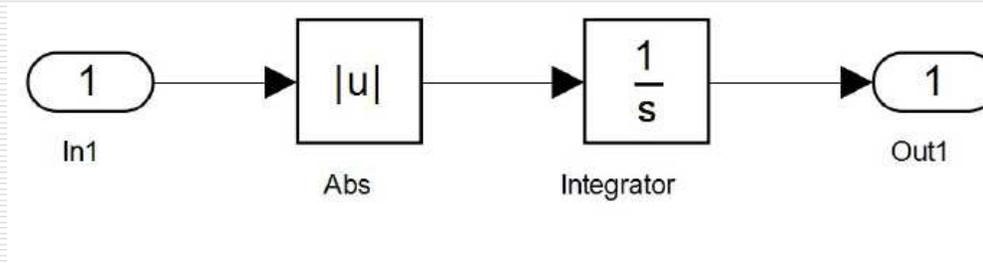
Critérios de desempenho ITAE

- ❑ ITAE penalizará erros que persistem no tempo
 - mas ITAE ignora erros que ocorrem inicialmente
- ❑ ITAE dará um tempo de acomodação mais curto
 - mas ITAE dará um overshoot mais largo



Critérios de desempenho IAE

- IAE proporciona um resultado intermediário entre ISE e ITAE

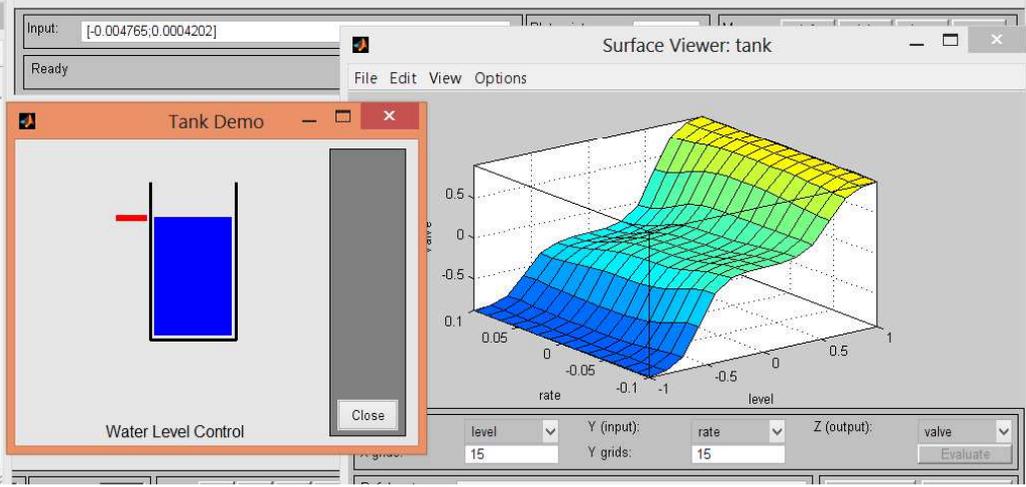
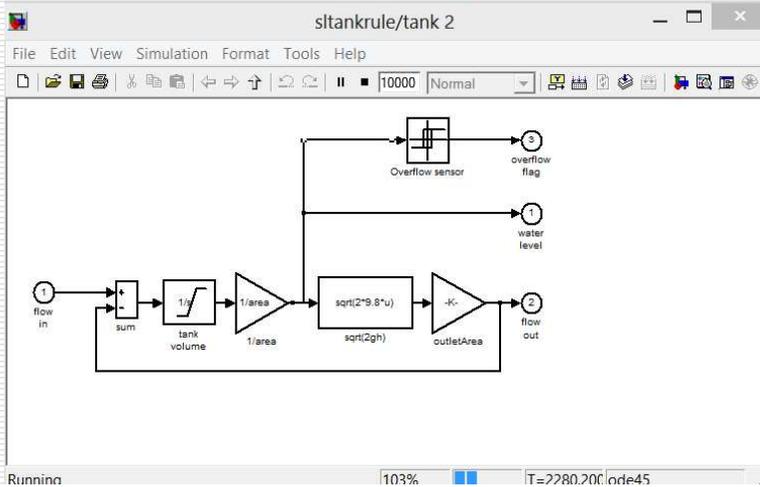
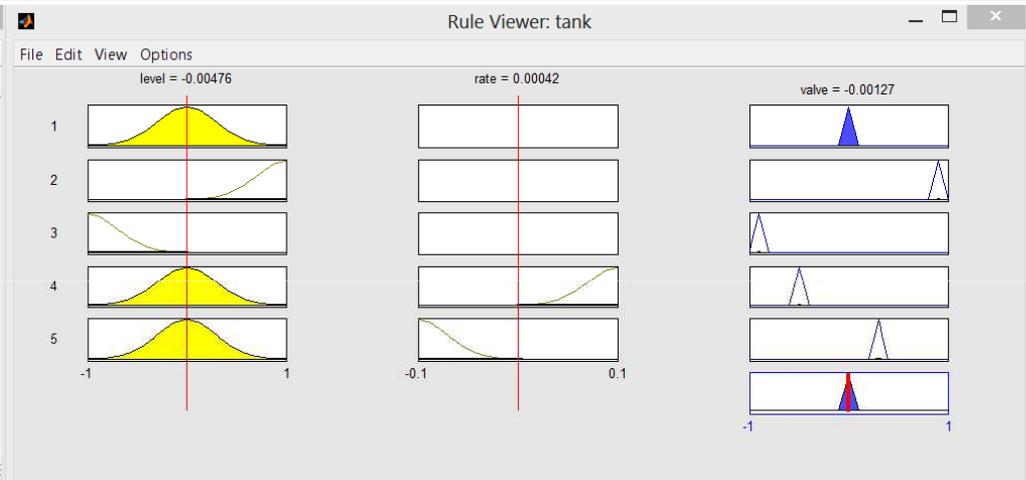
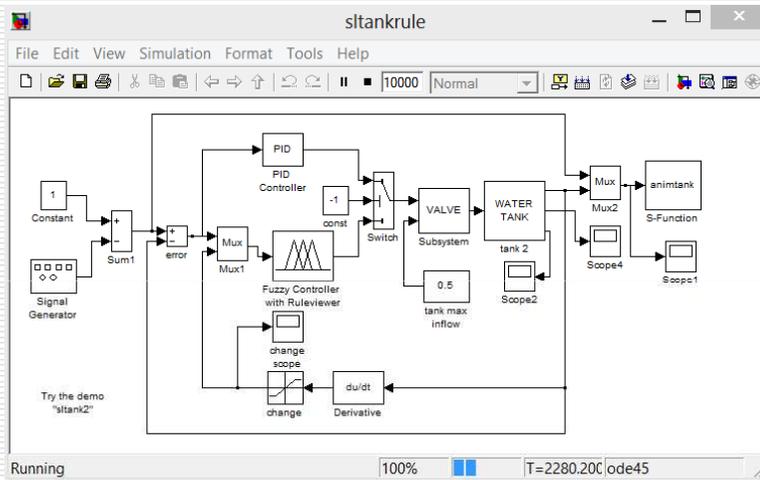


Exemplo

Aplicação exemplo

- Water Level Control in a Tank. By MathWorks
 - comandos: *sltankrule* e *fuzzy tank.fis*
 - <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/water-level-control-in-a-tank.html>
 - Objetivo: obter uma resposta do sistema a uma entrada em degrau para verificar a eficácia dos dois controladores, fuzzy e PID.
-

Exemplo Matlab – Controle de Nível num Tanque



Aplicação exemplo - Variáveis

- variáveis de entrada:
 - *level* [-1 1] 3 mf gaussianas
 - erro entre o nível medido e o set point
 - *rate* [-0,1 0,1] 3 mf gaussianas
 - variação do nível
 - se estiver subindo é positivo e se estiver negativo está descendo
 - variável de saída:
 - *valve* [-1 1] 5 mf triangulares
-

Aplicação exemplo - Regras

- nível alto acima do set point, fecha a válvula rápido
 - nível baixo abaixo do set point, abre a válvula rápido
 - nível normal e nível abaixo do set point e descendo (rate is negative, quer dizer que o nível está descendo), válvula fecha devagar
 - nível normal e nível acima do set point e subindo (rate is positive, quer dizer que o nível está subindo), válvula abre devagar
-

Aplicação exemplo – teste

- Exemplo no 'rule viewer'
 - nível em 1 e rate em -0.06
 - aciona saída valve 0.89 (abre válvula rápido)
 - nível em 0.5 e rate em -0.09
 - valve 0.15 (abre devagar)
-

Referências

- ❑ National Instruments. **Explicando a Teoria PID**. 2011. 5p
- ❑ Fernando Mariano Bayer, Olinto César Bassi de Araújo. **Controle Automático de Processos**. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria. 2011
- ❑ Grupo de Inteligência Computacional Aplicada. PUC Rio. Disponível no site da disciplina: ICA-LN-Controladores Fuzzy.pdf
- ❑ Ricardo Tanscheit. **Fundamentos de lógica fuzzy e controle fuzzy**. DEE-PUC-Rio. Notas de aula. 2007

Referências

- Ross, T. J., **Fuzzy Logic With Engineering Applications**, 3 ed., John Wiley and Sons, 2010.
- CAMPOS, Mario Massa de; SAITO, Kaku. **Sistemas inteligentes em controle e automação de processos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2004. xii, 235 p.
- Simões, Marcelo Godoy, and Shaw, Ian S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. Blucher, 2 ed. 2007.

Referências

- ❑ Passino, Kevin M., Stephen Yurkovich, and Michael Reinfrank. **Fuzzy control**. Vol. 20. Menlo Park, CA: Addison-wesley, 1998.
- ❑ WEINER, V.; MORATORI, P.; MASSA, M. C. M.; BERTINI, L.; COPETTI, A. **Controle supervisório fuzzy aplicado ao processo de separação e tratamento de óleo e água em uma plataforma de petróleo**. Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, 2016.
- ❑ Castillo, Oscar, and Patricia Melin. **A review on interval type-2 fuzzy logic applications in intelligent control**. Information Sciences 279 (2014): 615-631.

FIM

e-mail: alessandro.copetti@gmail.com